Aus der Chirurgischen Universitäts-Klinik Berlin Ziegelstraße
(Direktor: Prof. Dr. Rostock)

Anordnung der Bauelemente des Knochens im Schliff

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des

Medizinischen Doktorgrades

an der

Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Berlin

vorgelegt von

Günther Jentschura

aus Grünberg (Schlesien)

Tag der Promotion: 8. August 1941

Druck: Karl und Richard Hoffmann, Charlottenburg, Schillerstr. 44

M 156

Gedruckt mit Genehmigung

der

Medizinischen Fakultät der Universität Berlin

Dekan: Prof. Dr. Kreuz
Referent: Prof. Dr. Haase
Korreferent: Prof. Dr. Rostock

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Anordnung der Bauelemente des Knochens im Schliff.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550807_0150

Bei der Untersuchung über die Anordnung der Bauelemente im Knochen ist die erste Aufgabe, den Knochen so zu präparieren, daß er für die mikroskopische Untersuchung geeignet ist.

Im Laufe der Jahre wurde versucht, frischen, überlebenden Knochen direkt zu untersuchen. Dieses Vorgehen scheiterte aber an der Dicke des Materials, d. h. man konnte nur solche Knochenteile zur Untersuchung heranziehen, die von Natur aus fast durchsichtig sind.

Volkmann und Recklinghausen legten (nach Schaffer: Die Methodik der histologischen Untersuchung des Knochengewebes) dünnste Knochenbälkchen, die mit Pincetten aus der Diploe und Spongiosa herausgebrochen worden waren, unbearbeitet unter das Mikroskop. Aber alle diese Versuche führten zu keinem Ergebnis, weil derartige Methoden über den feineren Aufbau besonders größerer Knochen keinen Aufschluß geben konnten.

Will man die Anordnung der Elemente größerer Knochen untersuchen, muß man sich Knochenschliffe anfertigen. Zur Herstellung von Schliffpräparaten muß der Knochen besonders vorbereitet werden. Zuerst wird er sorgfältig maceriert und entfettet: Der frische Knochen wird von allen anhaftenden Weichteilen und vom Periost befreit; die Markhöhle wird eröffnet. Darauf wird der Knochen, ohne daß er trocken geworden ist, in Wasser gelegt und an einem warmen Ort ungefähr 3—6 Wochen aufbewahrt. Der Knochen wird nun unter dem Wasserstrahl abgebürstet und anschließend luftgetrocknet, jedoch nicht direkt der Sonne ausgesetzt. Enthält der Knochen dann noch Fett, wird dieses mit Benzol, Toluol oder Xylol bei Brutofentemperatur entfernt. Der so vorbereitete Knochen sieht vollkommen weiß aus.

Von diesem Knochen werden nun möglichst dünne und ebene Sägeschnitte angefertigt. Für kleinere Stücke

kann man dazu eine Laubsäge anwenden (Schaffer). Busch hat dazu als erster eine Kreissäge benutzt. Das auf einem Buchenstab aufgeleimte Knochenstück wird in einen kleinen Schlitten eingespannt, der gleichmäßig gegen die Kreissäge vorbewegt wird. Später ist von Czokor eine besondere Knochenschneidemaschine gebaut worden, die es gestattet, den Schnitt nach kurzem, beiderseitigen Polieren sofort unter das Mikroskop zu legen.

Die ausgeschnittenen Knochenblättchen müssen nun bis zur Durchsichtigkeit geschliffen werden. Entgegen älteren Methoden, bei denen Schleifpulver oder Bimsstein (Ranvier) benutzt wurden, wandte Busch als erster Feilen zur Herstellung der Schliffe an: Die eine Seite des Schnittes wird mit der Feile so geglättet, daß die Sägespuren vollkommen verschwunden sind. Dann leimt man das Plättchen mit der bereits geschliffenen Seite auf einen kleinen polierten Buchenholzblock, der in einen Schraubstock eingespannt wird. Um zu erreichen, daß das Plättchen ganz eben liegt, wird vorher noch eine Spiegelglasplatte darüber gedeckt. Dann wird die zweite Seite mit immer feineren Feilen — Furchenbreite $^4/_6$ mm bis $^4/_{24}$ mm — so lange dünn geschliffen, bis die Struktur des Buchenklötzchens durchschimmert.

Nachdem der Schliff in warmem Wasser von dem Klotz gelöst worden ist, wird er zwischen zwei Spiegelglasplatten getrocknet.

Ist der Schliff vollkommen trocken, muß er noch poliert werden. Zu diesem Zweck reibt man ihn entweder auf einer sorgfältig gesäuberten matten Glasplatte (Harting), glattem Papier, auf Waschleder mit geschlemmter Kreide (Stöhr) oder auf einem Abziehstein, bis beide Flächen vollkommen spiegelnd sind.

Diese Methode, zuerst in den Hauptlinien von Busch angegeben und angewandt, wurde von Gebhardt als Hauptmethode benutzt. Auf diese Weise lassen sich am besten und einfachsten brauchbare, alle notwendigen Einzelheiten wiedergebende Präparate erzielen.

Da aber andere Methoden des Schleifens ebenfalls häufig angewandt wurden, will ich zum Vergleich die wichtigsten anführen.

Tripel und Harting verwandten (laut Schaffer) Bimssteinpulver; dieses wurde, mit Wasser verrührt, auf eine matte Glasplatte gebracht und der Schliff auf beiden Seiten mit dem Finger so lange geschliffen, bis er die nötige Durchsichtigkeit besaß.

Ranvier schliff seine Schnitte zwischen zwei Bimssteinen. Diese Arten des Schleifens haben den Nachteil, daß die Schleifpulver aus den Präparaten schwer zu entfernen sind.

Schaffer benutzte an Stelle der Feilen verschieden feine Schleifsteine, mit denen er gute Ergebnisse erzielte. Der Sägeschnitt wird zuerst auf einem gröberen Stein mit dem Finger glatt und dünn geschliffen, dann gut abgewaschen. Anschließend wird der Schliff auf einem belgischen Abziehstein, Mississippi- oder Arkansasstein oder lithographischem Schiefer bis zur gewünschten Durchsichtigkeit behandelt. Nachdem er nun wieder gut gewaschen und getrocknet ist, erscheinen beide Seiten spiegelnd glatt.

Bei der Herstellung des Schliffes muß der Erhaltung der Spongiosa besondere Beachtung geschenkt werden. Zu diesem Zweck wird der Knochen in ein härteres Medium eingeschlossen. Schaffer füllt dazu die Markhöhle mit Siegellack, in den er auch den ganzen Knochen einbettet. Ranvier durchtränkt die Spongiosa mit Gummilösung und härtet diese in Alkohol. Beim Schliff muß dann natürlich Wasser vermieden werden. Schaffer hat auch sehr schöne Schnitte mit der Methode der Einbettung in harten Kanadabalsam erzielt, die er jedoch ausschließlich bei seinen Untersuchungen fossiler Knochen und Zähne anwandte.

Sollen die Schliffe als Dauerpräparate benutzt werden, müssen sie in ein konservierendes Medium eingeschlossen werden. Die älteste, einfachste und beste Methode ist die Füllung der Kanälchen mit Luft. Dieses Verfahren, von Krukenberg zuerst beschrieben und angewandt, ist die Einschmelzung in harten Kanadabalsam. Auf dem Objektträger und dem Deckgläschen wird je ein Tropfen dicker Kanadabalsam vorsichtig über nicht rußender Flamme erwärmt, damit er rasch nach dem Er-

kalten erstarrt. Nun legt man den sorgfältig getrockneten Schliff zwischen die beiden harten Balsamplatten auf Deckglas und Objektträger und drückt das Deckglas unter leichtem Erwärmen des Balsams gerade bis zur Zähflüssigkeit gleichmäßig auf. Anschließend wird das fertige Präparat auf eine kalte Metallplatte gelegt. Auf diese Weise erreicht man, daß der schnell erhärtende Balsam nicht in die Kanalsysteme eindringt und daß diese nun mit Luft gefüllt sind.

Eine ganz andere Art der Präparate sind Knochenschnitte. Bei diesen muß man in der Methode der Herstellung einen prinzipiellen Unterschied zwischen gefärbten und ungefärbten Präparaten machen. Gebhardt und v. Ebner lehnen die Färbung der Schnitte zur Erforschung des feineren Aufbaues des Knochens grundsätzlich ab, weil dadurch infolge der engen Lagerung der Fibrillen jede Einzelheit der Knochengrundsubstanz verloren geht. Außerdem ist die vorsichtige Entkalkung des Knochens (nach v. Ebner), die zur Herstellung der Schnittpräparate notwendig ist, für die Färbung der Schnitte nur schlecht geeignet.

Die Schwierigkeit der Entkalkung liegt darin, die anorganischen Bestandteile möglichst schonend, doch vollständig unter Erhaltung der Gestalt und Lage der organischen Substanzen, zu entfernen. Dazu müssen immer Säuren verwandt werden, die andererseits wiederum den Nachteil haben, daß die leimgebenden Fibrillen des Knochens in diesen zu stark quellen und so das Studium des feineren Fibrillenaufbaues erschweren, wenn nicht ganz unmöglich machen.

Die beste Methode der Entkalkung ist die nach v. Ebner: Der Knochen wird in eine seiner Größe entsprechende Menge kalt gesättigter Kochsalzlösung gelegt, die zu gleichen Teilen mit Aqua dest. verdünnt ist. Im Laufe der nächsten Tage wird der Flüssigkeit nach und nach so viel HCl zugesetzt, bis der Knochen vollkommen biegsam geworden ist. Nun wird der Knochen in Brunnenwasser ausgewaschen und wieder in zur Hälfte verdünnte NaCl-Lösung gebracht. Die bald auftretende saure Reaktion wird durch Zusatz von verdünntem Ammonium-

hydroxyd neutralisiert. Dies Verfahren wird solange wiederholt, bis die NaCl-Lösung nach Umschütteln nicht mehr sauer reagiert.

Durch den Kochsalzzusatz erreicht man, daß die Quellung der Fibrillen zurückgedrängt wird und die Fibrillen in ihrer normalen Lage erhalten bleiben. Die von dem so entkalkten Knochen hergestellten Schnittpräparate lassen bei der Untersuchung in Alkohol sehr gut punktierte und gestrichelte Lamellen unterscheiden. Vor allen Dingen sind die polarisatorischen Eigenschaften der Fibrillen durch diese Entkalkungsart gut erhalten. Dauerschnittpräparate können ohne weiteres durch Einschluß in Balsam hergestellt werden. Nur muß darauf geachtet werden, daß der Schnitt mit keinen Phenolderivaten in Berührung kommt, da diese die optischen Eigenschaften ändern.

Vergleicht man die Vor- und Nachteile der Dauerschnittpräparate einerseits mit denen der Dauerschliffpräparate andererseits, so ergibt sich folgendes: Die Dauerschnittpräparate verlieren allmählich alle Einzelheiten bei der Untersuchung im gewöhnlichen Licht. Im polarisierten Licht sind die optischen Erscheinungen lichtschwächer als in unentkalkten Schliffen, und die Struktur wird durch die Quellung auch etwas verändert.

Dagegen lassen die nach Krukenberg in hartem Balsam eingebetteten Schliffe im einfachen durchfallenden Licht sowohl die Knochenkörperchen mit ihren Ausläufern vollkommen in allen Einzelheiten als auch bei geeigneter Spiegelstellung die gestrichelten und punktierten Lamellen erkennen. Im polarisierten Licht betrachtet, treten die optischen Eigenschaften der Fibrillen bedeutend besser zu Tage als bei den Schnitten. Der Grund dafür liegt nach v. Ebner und Gebhardt darin, daß die Doppelbrechung der Fibrillen auf mechanischer Spannung beruht, die beim Knochenschliff vollkommen erhalten bleibt, ja durch den Wasserverlust und die dadurch bedingten Schrumpfungs- und Verdichtungsvorgänge ohne chemische Veränderung der Fibrillen vermehrt wird.

Aus diesen Erwägungen heraus muß man den Knochenschliffen unbedingt den Vorzug geben.

Vollkommene Ablehnung erfahren bei Gebhardt gefärbte Präparate wegen ihrer Ungenauigkeit und besonders gefärbte Schliffe, da bei ihnen im polarisierten Licht durch die Phenolbehandlung perverse Lichterscheinungen auftreten.

Die Untersuchung im polarisierten Licht, von Valentin und v. Ebner zuerst auf das Knochensystem angewandt, ist die Methode der Wahl, da sie vor allem einen Einblick in die im Knochen wirksamen mechanischen Lokalbedingungen ermöglicht.

Die Untersuchung geht folgendermaßen vor sich:

Bei parallel gestellten Nicol'schen Prismen (helles Gesichtsfeld) stellt man das zu untersuchende Objekt zunächst scharf in der Mitte des Gesichtsfeldes ein. Jetzt dreht man den Analysator um 90° — gekreuzte Nicols —, wobei das Gesichtsfeld verdunkelt wird. Falls doppelbrechend. Substanzen vorhanden sind, kann man sie bereits jetzt am stärkeren Aufleuchten erkennen. Während die Nicols in gekreuzter Stellung bleiben, dreht man langsam das zu untersuchende Objekt um 360°. Sind doppelbrechende Teile im Objekt vorhanden, erscheinen sie während der Drehung viermal im Maximum dunkel und viermal im Maximum hell. Bleibt das Objekt aber dunkel, untersucht man es zunächst in anderer Lage zu den Nicols oder fertigt unter Umständen ein neues Präparat an. Bei zu geringer Doppelbrechung kann man durch verzögernde Gipsplättchen ein besseres Bild erhalten. Das Gipsplättchen ist doppelbrechend. Wenn es nun in die Nicols eingeschaltet wird, zeigen sich Färbungen, die sich über die Gesamtfläche des Gesichtsfeldes ausbreiten und daher glatte Farben genannt werden. Diese wechseln mit dem Grade der Doppelbrechung, der Dicke und der optischen Achsenrichtung der Plättchen, sowie der Achsenstellung der beiden Nicols zueinander. Man beurteilt die Farben nach der Scala der Newton'schen Ringe, die sich durch die Interferenz der an und in dünnen Schichten zurückgeworfenen und gebrochenen Strahlen erzeugen und in verschiedenen Ordnungen schon von Newton selbst gesondert worden sind. Die Untersuchung der tierischen Gewebe er-

fordert hauptsächlich ein Gipsplättchen von Rot I. Ordnung, d. h., stellt man es in dem dunklen Gesichtsfeld des Polarisationsmikroskops so ein, daß seine Hauptschwingungsebene einen Winkel von $\pm 45^0$ mit jeder der beiden Polarisationsebenen bildet, so liefert es ein lebhaftes Purpurrot.

Bei der Untersuchung wird also so vorgegangen, daß das Gipsplättchen bei gekreuzten Nicols aufgelegt wird, so daß das Gesichtsfeld das Rot I. Ordnung im Maximum der Intensität zeigt. Nun betrachtet man damit das Objekt. Ist dieses doppelbrechend, so erscheint es bei der Drehung um 360^0 zweimal in Additionslage — d. h., es verstärkt die Grundfarbe zu violett —, zweimal in Subtraktionslage — wirkt dem Rot entgegen zu gelb — und viermal in der Grundfarbe Rot I. Ordnung.

Das Rot bleibt jedoch unverändert, wenn das Objekt nicht doppelbrechend ist. Auf diese Weise erkennt man auf jeden Fall auch die schwächste Doppelbrechung. Wenn man bedenkt, daß zu dieser Beobachtung nur die schwache bis mittlere Vergrößerung notwendig ist und so auch der Ueberblick nicht verloren geht, dann sind alle Forderungen für die Untersuchung gegeben.

Die grundlegenden Untersuchungen über den mikroskopischen Aufbau des Knochens gehen auf V. v. Ebner und A. v. Kölliker zurück. Ihre Befunde stimmen bis auf einen Punkt, nämlich den der Lokalisation der Kalksalze, völlig überein.

Eine Havers'sche Säule besteht aus dem Havers'schen Kanälchen und den konzentrisch um das Kanälchen geschichteten Lamellen. Die Lamellen sind aus Knochengrundsubstanz aufgebaut und enthalten die Knochenkörperchen, sowie die leimgebenden Fibrillen. Diese sind optisch aktiv und zwar positiv einachsig doppelbrechend, die optische Achse nach der Fibrillenlängsachse ausgerichtet. Die Fibrillen sind weiter zu feinen Bündeln zusammengefaßt, die jeweils in einer Lamellenschicht ungefähr die gleiche Richtung besitzen. Daraus ergibt sich die einheitliche optische Orientierung der Lamelle. Als letzte Bestandteile gehören die Kalksalze in das Havers'sche Sy-

stem hinein, auf deren Lokalisation gleich noch näher eingegangen wird.

In dieser Frage gehen die Ansichten von v. Ebner und v. Kölliker auseinander:

v. Ebner behauptet, daß die Kalksalze in den Zwischenräumen der Fibrillen und Fibrillenbündel eingelagert sind und die Fibrillen selbst frei bleiben.

v. Kölliker hält das Vorkommen von Kalksalzen in den Fibrillenzwischenräumen nur in minimalsten Mengen für möglich, da das Fibrillengefüge der Knochengrundsubstanz viel zu dicht ist, selbst viel dichter als das der Sehne. Seiner Meinung nach kommt als einziger Ort der Einlagerung der Kalksalze die Fibrille selbst in Frage.

Trotz seiner Wichtigkeit in anderer Beziehung ist jedoch dieser Punkt für die mechanischen Eigenschaften und somit die funktionelle Bedeutung der Knochengrundsubstanz nebensächlich. Gebhardt hat sich mit der Frage eingehend beschäftigt und sich der Meinung von v. Ebner angeschlossen. Er nimmt an, daß der Knochen aus den zugfesten Fibrillen und der druckfesten Zwischensubstanz besteht. Diese beiden Teile befinden sich in einem dauernden, elastischen Gleichgewicht, d. h. in gegenseitiger Druck-, bzw. Zugspannung und bedingen dadurch zum großen Teil die bestimmte optische Ausrichtung des Knochens, auf die später noch eingegangen wird. Gebhardt hat nun mit der numerischen Apertur (Abbe'sche Theorie) eine Fibrillenstärke von 0,6 μ errechnet. Die zu jeder Fibrille gehörige Zwischensubstanzumhüllung ergab 0,12 μ, d. h. also, zwischen zwei Fibrillen ist ein Raum von 0,24 μ vorhanden. In diesen Zwischenräumen können sehr gut die 66 % Kalksalze verteilt sein, besonders wenn man beachtet, daß zwischen den Fibrillenbündeln meist noch größere Räume vorhanden sind.

Ehe auf die Fibrillen als den wichtigsten Bestandteilen des Knochens näher eingegangen wird, sollen erst noch die Knochenkörperchen mit Bezug auf ihren Bau und Einbau in das Lamellensystem und ihre Verwertbarkeit zur Feststellung der Fibrillenrichtung besprochen werden.

Der Leib eines Knochenkörperchens kann als dreiachsiges Ellipsoid aufgefaßt werden, dessen lange Achse in der

Fibrillenrichtung steht. Die mittlere Achse steht senkrecht zu der langen Achse und liegt in der Lamellenfläche; die kurze steht auf den beiden ersten Achsen senkrecht, also radiär in der Havers'schen Säule. Daraus folgt, daß die Knochenkörperchenlängsachse je nach der Fibrillenstreichrichtung einen verschieden großen Winkel mit der Röhrchenlängsachse bildet. Andererseits kann man aus der Neigung der Knochenkörperchen schon einen Schluß auf die Fibrillenrichtung ziehen.

Allerdings erfordert die Verwertung der Knochenkörperchenansichten für die Beurteilung der Fibrillenstreichrichtung einige Ueberlegung darüber, was für verschiedene Formen der Anschliffe uns begegnen und was für Folgerungen daraus zu ziehen sind.

Querschlifffe ergeben Ansichten der Querschnittflächen, wenn die lange Achse senkrecht in dem System steht, d. h., wenn die Fibrillen senkrecht zur Gesamtachse stehen, oder schmale Seitenflächen, wenn die Fibrillenachse vollkommen quer, d. h. zirkulär um das Röhrchen läuft. Am meisten treten natürlich Uebergangsformen zwischen beiden Extremen auf, nämlich die halblangen Kantenansichten, da die Fibrillen nur äußerst selten im Winkel von 90^{0} oder 180^{0} verlaufen.

Bei Längsschliffen ist die Beurteilung etwas schwieriger. Lieger Tangentialschliffe vor, d. h. solche Lamellen, die gerade tangential angeschliffen sind, erscheinen die Knochenkörperchen in voller Breitenansicht, je nach der Richtung der Längsachse entweder senkrecht, wagerecht oder in allen Schräglagen. Ist jedoch eine Lamelle radiär getroffen worden, erscheinen uns die Knochenkörperchen in der schmalen Längsfläche, falls sie senkrecht stehen, in der Querfläche, wenn sie wagerecht liegen oder wieder in der halblangen Kantenansicht, wenn sie im schrägen Winkel zur Systemachse stehen, wie meistens. Wenn nun die Lamellen schräg angeschliffen werden, entstehen die mannigfaltigsten Kombinationen von Ansichten der Knochenkörperchen; denn bisher erschienen sie bei schräger Winkelstellung der Längsachse in einfach schiefer Projektion; jetzt kommt zur Schiefstellung des Knochenkörperchens gegen die Blicklinie noch die zur Systemachse des

Schnittes hinzu; es entstehen also doppelt schräge Körperchenprojektionen.

Alle diese theoretisch konstruierten Formen kommen in der größten Verschiedenheit vor.

Untersuchen wir nun die Knochenschliffe, und zwar zunächst die Querschliffe, so müssen wir außer dem oben Gesagten noch feststellen, ob eine Rechts- oder Linksschrägstellung der Knochenkörperchen zur Systemachse vorliegt, da die Ausrichtung der Fibrillen wichtig ist. Diesen Zweck erreicht man, wenn man während der Beobachtung im Mikroskop die Mikrometerschraube auf- und abbewegt. Wandert dann das optische Schliffbild von rechts nach links, so steht das Knochenkörperchen mit seinem Oberende nach rechts schräg geneigt zur Objektebene. Da alle Knochenkörperchen in einer Lamelle annähernd den gleichen Steigungswinkel zur Systemachse besitzen, wird die Beobachtung leichter, weil alle Knochenkörperchen einer Lamelle im gleichen Sinne wandern. Eine Messung des Winkels ist ungefähr möglich, wenn man die an der Mikrometerschraube abgelesene Zahl mit 1,5 (durchschnittlicher Brechungsindex der Präparate) multipliziert und diese Tiefenstrecke mit der gleichzeitig durchlaufenen Seitenverschiebung am Okularmikrometer in Beziehung setzt.

Bei der Untersuchung der Längsschliffe müssen wir die diametralen (= radialen) von den tangentialen unterscheiden. Der diametrale Schliff bietet keine Schwierigkeiten; er trifft alle Lamellen annähernd senkrecht zu ihrer Oberfläche. Somit müssen die Knochenkörperchen in der oben theoretisch gefundenen Ansicht, nämlich in der Schnittfläche zwischen langem und kurzem Durchmesser, in der Länge nach der Winkelstellung verschieden, erscheinen. Bei den tangentialen Schliffen erblicken wir die große Flächenansicht. Ist der Schliff etwas dicker, so daß mehrere Lamellen (2 bis 3) übereinander projiziert werden, dann treten die Knochenkörperchen gekreuzt auf. Durch entsprechende Einstellung der Mikrometerschraube ist die Unterscheidung der einzelnen Lamellen leicht möglich.

Für sämtliche Schliffe, die zwischen diesen beiden extremen Grenzfällen liegen, ergibt sich, daß ihr mittlerer Teil dem Tangentialschliff, ihr peripherster dem diame-

tralen Längsschliff entspricht, sie also alle Uebergänge von Knochenkörperchenansichten bringen.

Zwei Mikroaufnahmen, die von selbst hergestellten Knochenschliffen angefertigt worden sind, sollen die Verwertung der Knochenkörperchenansichten zur Beurteilung der Fibrillenstreichrichtung veranschaulichen:

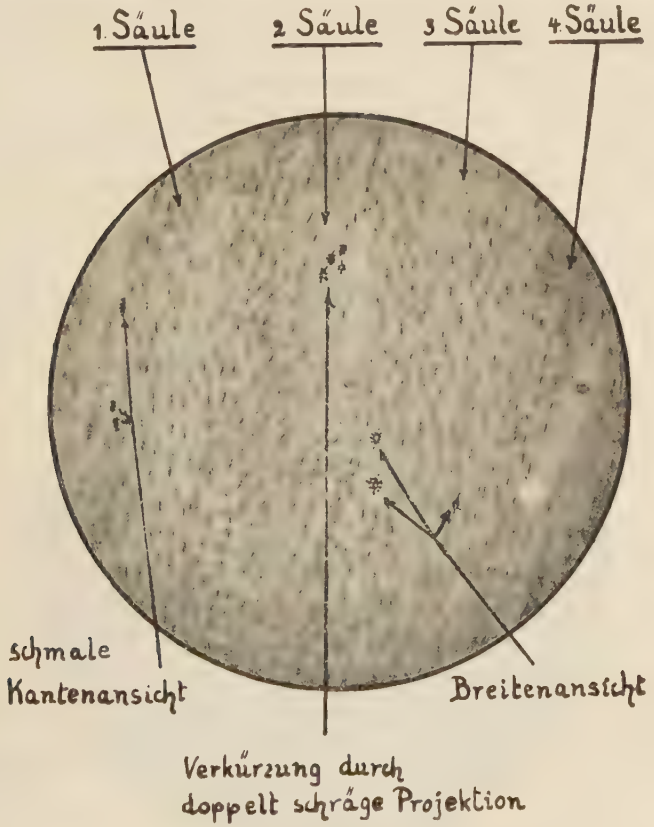

Bild 1: Längsschliff durch die crista interossea radii

Deutlich lassen sich vier Lamellensysteme unterscheiden:

Die erste Säule ist tangential angeschliffen; infolgedessen erscheinen die Knochenkörperchen in der Mitte in Breitenansicht, gegen den Rand in schmaler Kantenansicht. Da die Körperchenachsen mit der Systemlängsachse zusammenfallen, ziehen die Fibrillen senkrecht.

In dem zweiten System verlaufen die Fibrillen dagegen schräg, wie aus der Richtung der Achsen der Knochenkörperchen zu erkennen ist. Diese stehen in dem radial getroffenen Röhrchen nach rechts schräg geneigt zur Gesamtachse und erscheinen deshalb in schmaler Kantenansicht. Gegen den Rand hin tritt die Verkürzung der Körperchenlänge durch die doppelt schräge Projektion ein.

Das dritte Röhrchen ist wiederum tangential angeschliffen und zeigt die Knochenkörperchen in voller Breitenansicht parallel zur Gesamtachse.

Das vierte Lamellensystem erscheint wie das zweite im radialen Anschliff. Hier sind die Knochenkörperchen in ihrer schmalen Längenansicht zu erkennen.

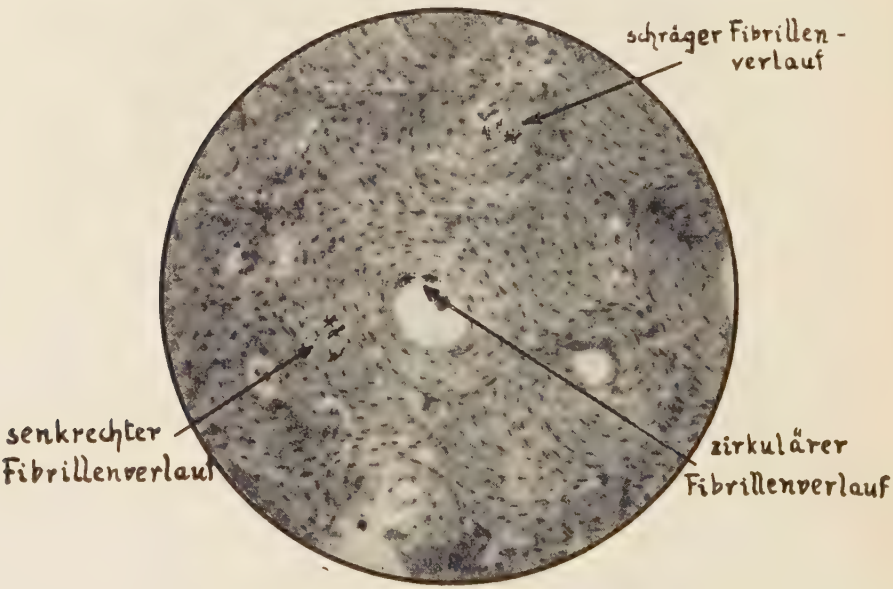

Bild 2: Querschliff durch die crista interossea radii.

Das in der Mitte der Aufnahme liegende Lamellensystem mit größerem Lumen zeigt die Knochenkörperchen in schmaler Kantenansicht und fast ganzer Länge. Dem-

nach ziehen die Fibrillen nahezu zirkulär um den Zentralkanal.

In dem darüber liegenden System treten die Knochenkörperchen verkürzt auf, also verlaufen die Fibrillen schräg zur Gesamtachse.

Links unterhalb der ersten Säule sind die Reste eines durch Umbau zerstörten Lamellenröhrchens zu erkennen. Hier sehen die Knochenkörperchen punktförmig aus, sie sind quer zwischen mittlerer und kurzer Achse angeschliffen. Daraus ergibt sich, daß die Fibrillen senkrecht zur Systemachse verlaufen.

Nachdem die Ansichten der Knochenkörperchen in den verschiedenen Schliffen zur Feststellung der Fibrillenrichtung verwertet worden sind, müssen auch die Fibrillen selbst genau untersucht werden. Hier steht uns außer der Untersuchung im gewöhnlichen durchfallenden Licht noch die aufschlußreichere Methode des polarisierten Lichtes zur Verfügung.

Zur Untersuchung im gewöhnlichen Licht eignen sich am besten Schnittpräparate, die nach der v. Ebner'schen Methode entkalkt worden sind, besonders wenn sie in starkem Alkohol liegen, da die Differenz der Brechungsindices zwischen Alkohol und Fibrillen sehr groß ist. Doch sind auch dünne Schliffpräparate bei starker Vergrößerung verwertbar. Wegen des dabei vorhandenen kleinen Gesichtsfeldes und der verhältnismäßig wenigen zur Untersuchung geeigneten Stellen im Präparat ist diese Methode nur zur Kontrolle anzuwenden. Da aber so die Fibrillen unmittelbar beobachtet werden, ist sie zur Bestätigung für auf andere Art festgestellte Befunde unerläßlich.

Wie erscheinen nun die Fibrillen in den verschiedenen Schliffen? Vorausgeschickt sei, daß die beiden extremen Fälle der Fibrillenrichtung, vollkommen senkrecht oder wagerecht, sehr selten vorkommen. Für diese besteht auch keine Schwierigkeit in der Erkennung: Im Querschnitt erscheinen sie entweder als Punkte — „punktierte Lamellen" — oder als feinste zirkulär verlaufende Striche —

„gestrichelte Lamellen" —, wobei zu beachten ist, daß gestrichelte Lamellen genau zu differenzieren sind, ob sie zu den eben erwähnten oder den unten angeführten schräg angeschliffenen Fibrillen gehören. Im diametralen Längsschliff sind die Verhältnisse genau umgekehrt, und im tangentialen Anschliff erscheinen beide als Striche, nur jeweils um 90° gedreht. Zwischen den beiden Extremstellungen sind natürlich die verschiedenen Winkelstellungen möglich, ja sogar die Regel. Am Querschliff sehen wir die Fibrillen je nach ihrer Neigung länger oder kürzer, aber alle liegen tangential zum Lamellensystem, also in Schraubenzügen. Durch Heben und Senken des Tubus kann auch hier die links und rechts gewundene „Schraube" ermittelt werden. Im diametralen Längsschnitt entstehen durch die parallele Projektion der Fibrillenbündel zur Systemachse für alle Neigungswinkel senkrechte Abbildungen, nur je nach dem Winkel mehr oder weniger gekürzt. Im longitudinalen Tangentialschliff lassen die Fibrillen am besten ihre Neigungswinkel zur Lamellenachse erkennen, denn die Projektion zeigt die wahre Gestalt und Lage.

Ehe nun auf die Untersuchung des Knochens im Polarisationsmikroskop eingegangen werden soll, ist es notwendig, kurz die Entstehung der polarisatorischen Erscheinungen des Knochens zu beschreiben. Diese beruhen nur auf Spannungsdifferenzen (siehe oben) und haben nichts mit den kristallinischen Substanzen des Knochens zu tun. Wie bleibt nun das Gleichgewicht der Spannungen der in der Längsrichtung zugfesten Fibrillen und der druckfesten Grundsubstanz (nach v. Ebner) erhalten? Ueber den Einfluß von mechanischen Spannungen auf organische Substanzen geben die Versuche von Ambronn und v. Ebner Aufschluß:

Wird ein Gelatinefaden einem Zug ausgesetzt (Ambronn), so wird er optisch aktiv und zwar positiv einachsig doppelbrechend mit der Achse in der Zugrichtung; wird in derselben Richtung Druck angewandt, so wird der Faden negativ einachsig doppelbrechend in Druckrichtungsachse. Wirkt aber der Druck von allen Seiten rechtwinklig zur vorigen Zugrichtung im Sinne einer Ausdehnungsverminderung (v. Ebner, Gelatinefaden in Alkohol), so

wird der Faden wie im ersten Fall positiv einachsig doppelbrechend, denn er wird gewissermaßen langgedrückt.

Ueberträgt man die Ergebnisse dieser Versuche auf die Knochensubstanz, so ergeben sich zwei Möglichkeiten der mechanischen Beziehungen zwischen Fibrillen und Knochengrundsubstanz:

1. Es ist eine druckfeste Grundsubstanz vorhanden, in der später während des Einflusses der Beanspruchung die leimgebenden Fibrillen entstehen. (Beispiel: Enchondrale Ossifikation — Knorpelknochengrenze.) Die Fibrillen werden also durch den Druck ausgerichtet (siehe Gelatinefaden in Alkohol), und zwar geschieht diese Ausrichtung durch sekundäre Druckkräfte, die allseits senkrecht zur Hauptdruckrichtung stehen. Ein Zusammendrücken der Fibrillen in der primären Hauptdruckrichtung ist wegen der fehlenden Drucksteifigkeit nicht möglich. In der druckfesten Grundsubstanz ruft dagegen der Druck in primärer Hauptrichtung durch die dadurch bedingte Querschnittsvergrößerung sekundäre Querdrücke hervor, die sich auf die Fibrillen auswirken. Die Beanspruchung der Fibrille durch allseitigen Querdruck ruft also hier dieselbe Spannung hervor, wie ein einfacher Längszug.
2. Es sind durch mechanische Beanspruchung bestimmt gerichtete Fibrillen vorhanden. Während der Fortdauer dieser mechanischen Verhältnisse erfolgt sekundär die Umwandlung des Gewebes in Knochen (Sehnenansätze). Hier ist also die Zugrichtung verantwortlich für die optischen Eigenschaften.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Fibrillen des Knochens sich unter den lokalen mechanischen Verhältnissen genau so verhalten wie im unverkalkten Bindegewebe. Es müssen also alle mechanischen Einflüsse auf das jetzt fertige Knochengewebe wie eine Längszugspannung der Fibrillen gewirkt haben. Diese sind dadurch positiv einachsig doppelbrechend in Längsachsenrichtung geworden. Da die Fibrillen in der Knochengrundsubstanz ganz eingespannt sind, beanspruchen sie ihrerseits durch Summation der Einzelspannungen die Grundsubstanz wie

ein äußerer Druck in der Fibrillenlängsrichtung. Es besteht also zwischen beiden Bestandteilen ein elastisches Gleichgewicht, welches die Konstanz der optischen Erscheinungen bewahrt.

Zur Untersuchung der Polarisationserscheinungen greifen wir uns eine Lamelle heraus. Diese eine aus dem Zusammenhang gelöste Lamelle ist also eine zylindrische Röhre, deren optische Effekte je nach der Steigung der Fibrillen verschieden sind.

Nehmen wir zuerst einen schwach steigenden Verlauf der Fibrillen an: Im Querschnitt bei fast zirkulärem Fibrillenverlauf entsteht ein schönes Polarisationskreuz, d. h. vier Quadranten erscheinen hell, die anderen vier dunkel. Bei Beobachtung mit dem Gipsplättchen Rot I. Ordnung erscheinen jetzt die dunklen Quadranten rot. Die hellen Quadranten sind jetzt paarweise je nach Fibrillenrichtung verschieden; die beiden, in denen die Fibrillenachse mit der Hauptschwingungsebene des Gipsplättchens zusammenfällt, zeigen Additionsfarbe, d. h. blau, während die beiden anderen bei senkrechter Stellung der Achsen zueinander in Subtraktionsfarbe, d. h. gelb, erscheinen.

Beim Längsschnitt durch eine Lamellenröhre (ergibt Flächenansicht der Lamelle von innen und zwei Wanddurchschnitte) ist das Polarisationsbild bei gekreuzten Nicols einheitlich hell; nur an den beiden Rändern gegen die Wanddurchschnitte hin, wo sich die Fibrillenprojektionen scheinbar zu 45° aufrichten, tritt je ein dunkler Längsstreifen auf. Dies ist die sog. Auslöschstellung der Fibrillen. Legen wir jetzt das Gipsplättchen mit der Hauptschwingungsebene parallel zur Lamellenlängsachse auf, so erscheint die Innenwand — Fibrillen fast senkrecht zur Plättchenachse — in subtraktivem Gelb. Im radialen Wanddurchschnitt — Fibrillen parallel zur Hauptschwingungsebene — tritt die Additionsfarbe blau auf. Die dunklen Randzonen — Auslöschstellung — erscheinen in der Grundfarbe Rot I. Ordnung.

Bei steiler Fibrillenrichtung zeigt der Querschliff fast reine Querschnitte der Fibrillen — punktierte Lamellen —, demgemäß bei Beobachtung mit den Nicols fast totale Dunkelheit mit nur ganz schwach angedeutetem Polarisa-

tionskreuz. Die Flächenansicht und die Wanddurchschnitte weisen totale Helligkeit auf. Mit dem verzögernden Gipsplättchen Rot I. Ordnung erscheint der ganze Längsschnitt in intensiver Additionsfarbe blau, bei paralleler Stellung der Schliff- und Gipsplättchenachse. Der Querschnitt ist fast ganz inaktiv rot mit nur ganz schwach angedeuteten Verfärbungen nach gelb oder blau in den entsprechenden Quadranten, hervorgerufen durch die vorhandene geringste Neigung der Fibrillen.

Ein Spezialfall tritt bei zufälliger Neigung der Fibrillen von 45° ein. Dann treten die oben genannten Randzonen der Auslöschstellung in der Mitte zusammen und geben einen dunklen, bzw. roten Mittelstreifen.

Auf diese Weise lassen sich die Fibrillenrichtungen gut erkennen, wenn die Voraussetzung einer genügenden Schliffdünne gegeben ist, sonst treten Ueberlagerungen auf. Die Differenzierung der Fibrillenstreichrichtung ist zur Erkennung des Baues der Havers'schen Speziallamellensysteme unbedingt notwendig.

Die Anordnung der Bauelemente des Knochens in Havers'schen Speziallamellensystemen ist eine überaus mannigfaltige; trotzdem treten eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten auf, die die Aufstellung von Typen des Lamellenbaues rechtfertigen.

Bei den in charakteristischer Weise feinfaserig lamellös gebauten Knochen lassen sich drei Grundtypen unterscheiden, aus deren Kombination die verschiedenen Anordnungen hergeleitet werden können:

Typ 1. Steile Faserrichtung in allen Lamellen. Eine optische Trennung der einzelnen Lamellen ist trotzdem möglich, da gewöhnlich die Faserrichtungsspirale abwechselnd rechts- und linksgängig ist. Der Kreuzungswinkel der Fibrillen ist dann doppelt so groß wie der Neigungswinkel zur Lamellensystemachse. Bei sehr steilem Fibrillenverlauf können die Lamellengrenzen allerdings undeutlich, selbst unsichtbar sein, besonders im Längsschliff, während sie im Querschliff noch recht gut zu erkennen sind. Im polarisierten Licht ist das Gebiet solcher Systeme im Querschnitt fast völlig inaktiv.

Die Verbreitung dieser vorwiegend steil gerichteten Faserverläufe findet sich hauptsächlich in Vogelröhrenknochen. Im Säugetierknochen kommen sie in reiner Ausbildung sehr selten vor. Gebhardt hat sie beim Menschen jedesmal parallel der crista interossea radii et ulnae etwas von der Oberfläche entfernt gefunden.

Typ 2. Die Fasern verlaufen durchweg in fast zirkulärer oder schwach ansteigender Richtung zur Systemachse, doch ebenfalls mit abwechselnd entgegengesetzter Windung. Im Querschnittbild sind die einzelnen Lamellen im Verhältnis zum 1. Typ gut unterscheidbar. Optisch zeigen Radial- und Tangentialschliff der Lamellen entgegengesetzte Farben mit zwischen beiden eingeschalteter Indifferenzzone (siehe oben).

Eine Besonderheit ergibt sich wieder, wenn sich die Fibrillen bis fast zur 45°-Steigung aufrichten; dann erscheint im Polarisationsbild der dunkle mittlere Indifferenzstreifen.

Ueber das Vorkommen dieser Typen 1 und 2 ist noch zu bemerken, daß sich die schwach ansteigende Faserung vorwiegend in Systemen mit großem Querschnitt mit weitem Lumen findet. Dagegen sieht man bei kleinen Systemen mit engem Zentralkanal meist den steilen Faserverlauf. Diese Verteilung ist keine zufällige und kann mit Einschränkungen als allgemein gültig angesehen werden.

Typ 3. Dieser Typ baut sich im Grunde genommen aus den beiden ersten auf. Er stellt eine Mischung von beiden dar. Hier wechseln ständig Lamellen mit steilem Fibrillenverlauf mit solchen ab, in denen die Fasern eine schwach ansteigende Richtung haben. Die entgegengesetzte Windung ergibt für die aufeinanderfolgenden Lamellen eine fast rechtwinklige Faserkreuzung, dementsprechend sind auch die optischen Eigenschaften entgegengesetzt.

Aus diesen drei Grundtypen entwickeln sich eine Reihe kombinierter Typen dadurch, daß in einem Lamellensystem zonenweise die eine oder die andere Art der Schichtfolge vorherrscht. Diese kombinierten Typen sind in der Natur bedeutend häufiger als die drei Grundtypen. Angesichts der Tatsache, daß die Grundtypen 1 und 3 fast regel-

mäßig innen und außen von je einem Ring von Lamellen mit zirkulärer Faserrichtung eingeschlossen sind, kann als reiner Grundtyp nur noch der Lamellenbau aus flach ansteigenden Fibrillen angesehen werden.

Wie sehen nun solche Kombinationslamellensysteme aus?

Einige Beispiele der häufigsten Arten:

a) Außen und innen Zonen mit steiler, die Mittelzone mit schwach ansteigender Faserrichtung.

b) Gekreuzter Fasertyp außen und innen, in der Mitte steil ansteigende Fasern.

c) Außen gekreuzt, Mittelzone steil, innen fast zirkulär verlaufend.

d) Außen zirkulär, Mittelzone steil, Innenzone gekreuzt.

Am meisten treten also die steil gerichteten Fasern in der Mittelzone der Lamellensysteme auf. Demgemäß müssen die Polarisationsbilder der Querschliffe am häufigsten eine Inaktivität der mittleren Gebiete aufweisen, die innen und außen von jeweils mehr oder weniger aktiven Randzonen umgeben sind.

Bei der Untersuchung menschlicher Knochen über die Anordnung der Havers'schen Speziallamellensysteme muß darauf geachtet werden, daß ältere Systeme durch Resorptionsvorgänge angefressen sind und daß die sich neu bildenden Systeme oftmals nicht genügenden Raum zur vollständigen, regelrechten Entwicklung gefunden haben. So gelangt man bei der Untersuchung zu reichlich verwirrten Bildern; besonders ist das der Fall bei den langen Röhrenknochen der menschlichen Extremitäten. Doch gibt es auch im Knochen, der sich in ständigem Umbau befindet, Stellen, die von den Umwälzungen wenig betroffen werden, in denen die vollentwickelten Typen der Havers'schen Speziallamellensysteme nach einmaliger Ausbildung erhalten sind.

Welche mechanische Bedeutung haben nun diese auffälligen Bauverhältnisse der Havers'schen Lamellensysteme? Für das unverkalkte geformte Bindegewebe ist die funktionelle Ausrichtung von vornherein klar: Der Anspannung wegen wird jeder Teil mitbeansprucht, wenn das Ganze in Funktion tritt. Die dazu notwendigen ge-

ringfügigen Verschiebungen der Einzelelemente, sowie des Ganzen sind in dem weichen Gewebe ohne weiteres möglich. Diese Möglichkeit besteht aber bei den Lamellensystemen nicht! Die einmal unter dem Einfluß lokaler mechanischer Verhältnisse angenommene Lage der Fibrillen in der kalkhaltigen Grundsubstanz bleibt solange erhalten wie die Knochensubstanz selbst. Die alten Fibrillen können nur durch neue anders gelagerte ersetzt werden.

Um die mechanischen Eigenschaften der Havers'schen Lamellensysteme zu analysieren, hat Gebhardt ein der Natur nachgebildetes Modell Versuchsbeanspruchungen unterworfen. Abgesehen von der Verschiedenheit der Faserrichtung in einem Lamellensystem, bietet eine Lamelle, aus dem Verband herausgenommen, das Bild einer Röhre mit zylindrisch-schraubig gefaserter Wandung. Demgemäß haben für sie in Bezug auf mechanische Beanspruchung die Eigenschaften der Torsionsstrukturen Gültigkeit. Das zu diesen Versuchen benutzte Modell besteht aus einem Schraubenfederzylinder aus elastischen Messing- oder Stahldrähten, der oben und unten durch eine kreisförmige Holzscheibe verschlossen ist. Zum Schutz gegen unbeabsichtigtes Ausweichen des Zylinders ist ein Eisenstab als Führung in der Zylinderachse aufgestellt, mit der unteren Holzscheibe fest verbunden, die obere dagegen durchbohrend, in ihr dreh- und verschiebbar, jedoch auf Wunsch mittels einer Klemmenschraube an ihr zu befestigen.

Aus den vielen Versuchen lassen sich folgende Ergebnisse über die Eigenschaften von zylindrischen Schraubenfedersystemen zusammenstellen:

Bei axial gerichtetem Längsdruck erweitert sich der Umfang und das Lumen gleichmäßig unter Beseitigung der Einknickungstendenz dünnwandiger gewöhnlicher Röhren. Bei axialem Längszug verengern sich beide gleichmäßig rund herum. Bei Behinderung der unter dem Einfluß von Längszug oder -druck eintretenden Querschnittsänderungen entstehen Verdrehungen, und zwar bei Druck im Sinne einer Vermehrung, bei Zug im Sinne einer Verminderung der Schraubenumgänge. Die Umkehrung dieser Versuchsanordnung ist genau so möglich: Bei Konstanz der Systemlänge entsteht eine Querschnittsverminderung bei

Verdrehung des Systems im Sinne einer Umgangsvermehrung, eine Querschnittsvermehrung im Sinne einer Umgangsverminderung. Dagegen finden wir bei Verhinderung der Querschnittsänderung Verkürzung bei Umgangsvermehrung und Verlängerung bei Umgangsverminderung.

Primäre Querschnittsveränderungen durch allseitigen oder einseitigen Querzug oder Querdruck rufen ebenfalls sekundäre Längenänderungen oder Verdrehungen hervor, wobei deren Ausmaß in Abhängigkeit voneinander steht.

Bei diesen Versuchen werden also die Schraubenfedern hauptsächlich auf Torsion und Biegung beansprucht, wobei die Schraubensteigung für das Vorherrschen des einen oder des anderen Moments von Bedeutung ist. Es ist also notwendig, den Einfluß der Schraubensteigung auf die Federn zu kontrollieren. Es ergibt sich, daß bei Längsdruckbeanspruchung die Querdurchmesserzunahme bei gleicher Kompressionshöhe und gleicher Windungszahl bei den steiler gewundenen Schraubenfedern erheblich größer ist als bei den schwach ansteigenden. Bei Behinderung der Querdurchmesserzunahme resultieren Verdrehungserscheinungen, die ebenfalls bei den steilen Systemen bedeutend stärker sind. Der Längszug hat auch entsprechende Veränderungen zur Folge: Das flache System liefert geringe Querschnittsänderungen und damit bei Behinderung geringere Verdrehungen als das gewundenere.

Im Hinblick auf die Zusammensetzung der Havers'schen Lamellensysteme erfolgte anschließend die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Kombination beider Systemmodelle zu einem mechanischen Elementenpaar. Bei diesem kombinierten System aus innen steilen und außen flachen entgegengesetzt gewundenen Federn wird bei axialer Längsdruckbeanspruchung infolge der Verschiedenheit der Querschnittszunahme bei gleicher Verkürzung eine erhebliche Versteifung erreicht, welche weit über die Summe der Widerstandsfähigkeiten der einzelnen Systeme hinausgeht. Trotzdem ist die Elastizität nicht eingeschränkt. Bei fester Verbindung der beiden Systeme wirkt jede Behinderung der Verdrehung als wirksame Ver-

steifung, also deformationsbehindernd und damit verfestigend auf die ganze Konstruktion.

Da in den Havers'schen Lamellensystemen auch Lamellenrichtungen auftreten, in denen in aufeinanderfolgenden Lamellen die Faserrichtung gleichsinnig gewunden ist, sollen auch die Ergebnisse der Versuche mit dem entsprechenden Modell angeführt werden. Bei Beanspruchung im axialen Längsdruck — die flachen Fasern liegen wieder außen — ist die Steifigkeit noch größer als im Falle entgegengesetzter Windung, die absolute Querschnittserweiterung sehr gering, die Elastizität bei erheblicher Tragkraft eine durchaus vollkommene. Die Hauptdeformation besteht in einer allgemeinen Verdrehung im Sinne einer Umgangsvermehrung.

Bei Beanspruchung auf Längszug ergibt sich für beide Kombinationen — gleichsinnig, sowie entgegengesetzt gewunden — bei äußerem flachen Faseranstieg infolge ungleicher Querschnittsänderung eine Entfernung beider Systeme von einander. Liegen jedoch die steilen Fasern außen, ergeben sich mehr oder weniger starke Versteifungen.

Aus dem oben Gesagten geht hervor, daß bei Kombination von mehr als zwei Systemen in verschiedensten Faserrichtungen eine starke Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Zug und Druck in der Längsrichtung erreicht wird.

Neben der Untersuchung über die Längenveränderungen — Zug und Druck — als primäre Beanspruchungsart kommen außerdem noch die durch Torsion und Biegung in Frage.

Die Torsionsbeanspruchung eines röhrenförmigen Körpers, dessen Wandung aus mehreren, in abwechselnder Richtung schraubig gefaserten Lamellen besteht, setzt sich bei Behinderung der Längenverschiebung in Flächendrücke der Lamellen gegeneinander um, und zwar auch dann, wenn die Steigungen im gleichen Sinne verlaufen. Ist die Längenänderung aber nicht oder nur teilweise behindert, ergeben die abwechselnd gewundenen Kombinationen stärkere sekundäre Längenänderungen. Es tritt dann wieder ein Unterschied zwischen steilen und flachen Systemen

auf: Die steilen streben hauptsächlich nach Längenveränderungen, die flachen reagieren mit axialen Verdrehungen. Dabei passen sich aber die flachen Systeme bei entsprechender Fixierung den steilen an, d. h., sie machen die Längenveränderungen mit, doch setzen sie andererseits den Querschnittsänderungen großen Widerstand entgegen; die flachere Steigung besitzt hier die größere Steifigkeit.

Dagegen leistet die mehr zirkuläre Schraubenfeder weitaus geringeren Widerstand gegen Biegung im Sinne einer Biegung der gemeinsamen Achse des gesamten Systems. Der Grund liegt in der fast reinen Torsionsbeanspruchung des Materials, die der Torsionsfestigkeit umgekehrt proportional ist. Dabei treten nur sehr geringe Querschnittsänderungen auf. Um so steifer ist die steil steigende Feder gegen Verbiegung in der Gesamtachse. Je steiler die Richtung, desto steifer ist das System, denn dadurch nimmt die Torsionsbeanspruchung der Drähte immer mehr ab gegenüber der direkten Biegungsbeanspruchung. Das Maximum der Widerstandsfähigkeit gegenüber Biegung bildet hier die Zusammensetzung der Wand aus achsenparallelen Fasern.

Im ganzen gesehen, bietet also die rein senkrechte Faserung den größten Widerstand gegen Biegung und außerdem noch gegen direkten Querdruck und die durchgehend zirkuläre Faserung gegen Torsion und Querzug.

Am Schluß der mechanischen Beobachtungen am Modell muß betont werden, daß die hierbei gefundenen Ergebnisse natürlich nur relativ zu bewerten sind, und daß das hier empirisch Gefundene zur Klärung der mechanischen Bedeutung der Havers'schen Speziallamellensysteme angewandt worden ist.

Nun soll die Zusammensetzung der verschiedenen Typen der Havers'schen Speziallamellensysteme als Grundlage der Widerstandsfähigkeit gegen vorherrschende Belastungsweisen besprochen werden. Es brauchen hier jedoch nur die zwei Haupttypen der Systemanordnungen erwähnt und ein kurzer Ueberblick über die spezifische Leistung dieser gegeben zu werden. Es ist dann ohne weiteres möglich, aus den Modellbesprechungen analog die me-

chanischen Eigenschaften der kombinierten Typen herzuleiten.

Das erste Hauptsystem ist das, in dem die Fasern unter annähernd gleichem Winkel abwechselnd rechts und links verlaufen. Aus dem am Modell gewonnenen Erfahrungen ergibt sich: Dieses System bietet vollkommene Versteifung gegen Verwindung um die Längsachse; denn es wird immer abwechselnd eine Lamelle im Sinne einer Umgangsvermehrung, die nächste im Sinne einer Umgangsverminderung beansprucht. Die Lamellen werden also stets paarweise fest aufeinandergepreßt, es resultieren demnach radiär und quer zur Achse gerichtete Flächendrücke. Gleichzeitig entstehen aus dieser gegenseitigen Behinderung sekundäre Längsspannungen im System, da sich die Lamellen mit behinderter Querschnittsausdehnung zu verkürzen suchen. Bei der vorausgesetzten Rechts- und Linksverwindung wird dabei jede Lamelle einmal gegen die nächste äußere, das andere Mal gegen die nächste innere gepreßt.

Gegenüber Längsdruck oder -zug bieten sich bei diesem System keine gegenseitigen paarweisen Versteifungen der Lamellen, somit zunächst auch keine sekundären Torsionsmomente für das ganze System. Hier sind jetzt die Steigungswinkel von ausschlaggebender Bedeutung. Die steil steigenden Lamellensysteme müssen als sehr steif gegenüber Längenänderungen betrachtet werden. Sie erleiden zwar schon bei geringen Längenverschiebungen verhältnismäßig große Querschnittsänderungen; diese können aber im Knochen nicht in dem Maße oder überhaupt nicht zur Auswirkung gelangen, einerseits wegen des guten Zusammenschlusses der Elemente in Längsrichtung und andererseits wegen der als Umgürtung wirkenden Umgebung. Die aus dieser letzten Behinderung sofort resultierenden Torsionsmomente heben sich äußerlich durch die abwechselnd rechts und links gleichmäßig gewundene Steigung auf, innerlich versuchen die Lamellen jedoch sich gegeneinander zu verdrehen. Die mehr zirkuläre Faserung ist bedeutend elastischer gegenüber Längenänderungen. Hier tritt auch bei relativ größeren Längenverschiebungen nur eine geringe Querschnittsänderung ein. Die primäre Widerstands-

kraft der mehr zirkulären Fasern gegen Längenänderungen hängt hauptsächlich von der Druck- und Zugfestigkeit ihrer Substanz in der Richtung quer zum Faserverlauf ab.

Der zweite Haupttypus besteht aus Lamellensystemen, in denen die Einzellamellen mit sehr steilem Fibrillenverlauf mit solchen fast zirkulären, in entgegengesetzter Windung verlaufenden abwechseln. Hier besteht ausgesprochene Steifigkeit gegen Längenänderungen. Und zwar wird sie dadurch bewirkt, daß bei Zug die steiler gefaserten Lamellen stets an die zirkuläre innere Lamelle und bei Druck an die nächste äußere herangepreßt werden. Dazu treten noch Verwindungsmomente, deren Richtung stets den steilen Lamellen entspricht. Dabei besteht immer die Tendenz der axialen und tangentialen Längsverschiebung mit abwechselnder Richtung bei Druck und Zug. Wegen der fast zirkulären Fasern bleibt aber doch eine gewisse Elastizität gegenüber Längenänderungen mit geringer Gesamtquerschnittsänderung bestehen. Gegen primäre Torsion ist dieser Typ genau so versteift wie gegen Zug und Druck durch paarweises Anpressen der Lamellen.

Wird ein Knochen nun auf Biegung beansprucht, so wird von den Havers'schen Lamellensystemen nur eine ganz verschwindende Anzahl direkt der Biegung ausgesetzt. Vielmehr werden bei Biegung z. B. eines langen Röhrenknochens die Lamellensysteme der Zugseite nur auf Zug, die der Druckseite im wesentlichen nur auf Druck beansprucht. Nur die ganz wenigen, die gerade in der Gesamtneutralitätszone des Knochens liegen, werden selbst gebogen. Schon das Verhältnis der Querschnittsgröße eines Lamellensystems zu seiner Länge läßt die Biegungssteifigkeit des Knochens weniger auf eine Summierung der Einzelsteifigkeiten gegen Biegung zurückführen als vielmehr auf gegenseitige Sicherung der Röhrchen durch Anastomosen, Umschlingungen und Einfalzungen gegen Längsverschiebungen untereinander. Dazu wirkt verstärkend ihre durch gegenseitigen dichten Anschluß erhöhte Zug- und Druckfestigkeit in der Längsrichtung. Hier ergibt sich der Fall der Arbeitsteilung zwischen steil und mehr zirkulär gefaserten Kanälchen, und zwar leisten auf der

Zugseite die steilen, auf der Druckseite die zirkulären Systeme den Hauptteil der Arbeit. Im ganzen bieten die steilen Fasern bei vorwiegender Biegungsbeanspruchung die bessere Leistung bei gleichzeitig vorhandener guter Elastizität.

Umgekehrt liegen die Verhältnisse bei Ausübung eines Querdruckes oder -zuges gegen einen Röhrenknochen (z. B.), wobei die Umgebung das Widerlager darstellt. Hier besteht bei dem steilen, englumigen Röhrchen geringe Wandelastizität. Dazu treten noch verwindende Momente durch Umsetzung eines Teils der primären Spannung in Längsspannung und Behinderung dieser durch die Umgebung. Das zirkulär gefaserte Röhrchen läßt diese Umsetzung gar nicht entstehen. Es deformiert sich als sehr elastische Hohlraumwandung mit wesentlich im Querschnitt verlaufenden sekundären Spannungen. Die Verteilung des Insults findet also hauptsächlich in querer Richtung statt.

Nach Betrachtung der Anordnung der Bauelemente des Knochens und ihrer mechanisch funktionellen Bedeutung bleibt noch die Frage zu erörtern, ob und wie weit die Entstehung der Havers'schen Lamellensysteme schon unter dem Einfluß mechanischer Bedingungen stattfindet und wie weit die Funktion auf den Umbau fertigen Knochens fördernd wirkt.

Gebhardt kann dafür noch keine Hypothesen aufstellen und führt nur einige Mutmaßungen an. Er betrachtet das erste Auftreten der Knochenbildung in Schädeldeckknochen von Embryonen in den Lageverhältnissen zu den Gefäßen und hat daraus einigen Anhalt gewonnen für den Ort und die Ausgestaltung der ersten Anlage, besonders im Hinblick auf die Verhältnisse der Diffusionsströmungen und gewissen Eigentümlichkeiten der „amöboiden Körperzellen". Die ganz allgemein tangential zu den Gefäßen stattfindende Ausrichtung der Fibrillen faßt er als senkrechte Einstellung der Fibrillenachsen zu den radiär ausstrahlenden Druckschwankungen der Gefäßpulsation auf. Der Wechsel der Fibrillenrichtung in benachbarten Lamellen ist durch die dimensionalen Elastizitätsverhältnisse der Lamellen bedingt; und zwar strebt jede fertige

als Anlagerungsbau für die nächste geltende Lamelle — mittels ihrer quer zur Faser liegenden größten Deformierbarkeit - - danach, die sich neu anlagernden Fibrillen quer zu ihrem eigenen Verlauf auszurichten. Länge und Steifigkeit der Bündel, sowie die Enge des Anlagerungskanals wirken begünstigend auf eine longitudinale Ausrichtung.

Der Einfluß der Funktion auf den bereits ausgebildeten Knochenbau kann sich nach zwei Seiten hin äußern. Einmal kann sich die Funktion rein quantitativ auswirken und zwar dann, wenn sehr anpassungsfähige — „reizbare" — Knochensubstanz und starke, verschiedene mechanische Momente vorhanden sind. Der Knochen kommt alsö bei fortwährendem Wechsel starker Beanspruchungen in allen Richtungen bei hoher funktioneller Reizbarkeit niemals zur Ruhe, und infolge dieses dauernden Umbaues ergeben sich die vielen Unregelmäßigkeiten der Havers'schen Lamellensysteme. Vom qualitativen Standpunkt aus betrachtet, führt andererseits die Funktion zu um so regelmäßigeren Bildungen, je konstanter und einförmiger die Verrichtung des betreffenden Organes ist. Analysieren wir, in welche mechanischen Faktoren die Funktion bei allen Arten der Havers'schen Speziallamellensysteme und bei jeglicher Art der Beanspruchung sich zerlegen läßt, so ergeben sich nur längs und quer gerichtete Spannungen. Hierin liegt ein sehr wichtiger Grund für die „Spannungsauslese" im Knochen, welche nur die primären, normal zur Oberfläche gerichteten Druck- und Zugspannungen als gestaltende Momente erscheinen läßt.

Zur Ueberprüfung der Herstellungsmethoden von Knochenschliffen wurden eigene Präparate angefertigt. Es stellte sich heraus, daß die Gebhardt'sche Methode mit kleinen Abwandlungen die besten Ergebnisse liefert:

Der frische Knochen wird maceriert; nach dreiwöchentlichem Liegen in warmem Wasser (38°) wird er unter dem Wasserstrahl abgebürstet und sodann luftgetrocknet. Etwa noch vorhandene Fettreste werden im Benzindampf mit einer Bürste entfernt.

Von dem so vorbereiteten Knochen werden möglichst dünne Sägeschnitte hergestellt. Dazu wird er in einen

Schlitten eingespannt, der gleichmäßig gegen eine kleine von einem Elektromotor betriebene Kreissäge vorbewegt wird. Die so gewonnenen Knochenscheibchen haben die Stärke von $^1/_4$ bis 1 mm.

Zum Schleifen habe ich anstelle der von Gebhardt angewandten Feilen einen feinkörnigen Schleifstein benutzt. Der runde Schleifstein liegt wagerecht und wird ebenfalls von einem Elektromotor getrieben. Eine über dem Stein angebrachte Wasserflasche mit Tropfvorrichtung hält ihn laufend feucht. Die Sägeschnitte werden auf den rotierenden Stein mit dem Finger (dünner Gummischutz!) oder mit einem Korken leicht angedrückt und so lange geschliffen, bis die gewünschte Dünne erreicht ist. Das zur Regulation des Druckes notwendige Fingerspitzengefühl, das man schon nach kurzer Zeit erlangt, bildet eine gute Kontrolle der Schliffstärke.

Der fertige Schliff muß 24 Stunden trocknen und wird dann in glasharten Kanadäbalsam eingebettet. Auf eine dünne Metallplatte wird ein Objektträger mit einem entsprechenden Stück Kanadabalsam gebracht und mit dem Bunsenbrenner so lange erwärmt, bis der Balsam gerade zähflüssig wird. Nun wird der Schliff schnell eingelegt und mit einem Deckglas zugedeckt. Zur sofortigen Erhärtung des Balsams muß das Präparat gleich auf eine kalte Unterlage gebracht werden.

Diese Methode gestattet, schnell und sicher auch Serienschnitte von einem ganzen Knochen herzustellen.

Zusammenfassung.

1. Möglichkeiten der Verwertung der Knochenschliffe:

Bei der Untersuchung im gewöhnlichen, durchfallenden Licht erlauben die Schliffe durch die Beurteilung der Knochenkörperchenansichten einen Schluß über den Verlauf der Fibrillen zu ziehen. Bei kleiner Blende und geeigneter Spiegelstellung sind auch die Fibrillen selbst jetzt schon — „punktiert" oder „gestrichelt" — zu erkennen. Bei Verwendung eines Polarisationsmikroskopes sind die Fibrillen durch ihre polarisatorischen Eigenschaften, die beim Schliff erhalten bleiben, direkt zu verwerten.

2. Methoden der Herstellung von Knochenschliffen:

Gebhardt hat den macerierten Knochen mit einer Kreissäge in dünne Scheiben geschnitten, anschließend mit Feilen bis zur nötigen Durchsichtigkeit geschliffen, auf Abziehsteinen poliert und in harten Kanadabalsam eingeschlossen.

Ranvier verwandte anstelle der Feilen zwei Bimssteine zum Schleifen.

Tripel und Harting benutzten zur weiteren Bearbeitung der Sägeschnitte eine matte Glasplatte und mit Wasser verrührtes Bimssteinpulver.

Schaffer schliff seine Sägeschnitte mit dem Finger auf verschieden feinen Schleifsteinen.

Czokor hat eine besondere Knochenschneidemaschine gebaut, deren Schnitte nach kurzem Polieren sofort unter das Mikroskop gelegt werden konnten.

3. Auf Grund eigener Versuche schlage ich zur Herstellung von Schliffpräparaten folgende Methode vor:

Der macerierte Knochen wird mit einer elektromotorisch getriebenen Kreissäge in dünne Scheibchen geschnitten. Diese werden auf einem wagerecht liegenden Schleifstein, der ebenfalls von einem Elektromotor getrieben wird, bis zur gewünschten Dünne geschliffen. Nach 1-tägigem Trocknen kann dieser Schliff ohne weitere Behandlung in glasharten Kanadabalsam eingeschlossen werden.

Nach Beendigung der Arbeit gestatte ich mir, dem Dozenten Herrn Oberarzt Prof. Dr. Haase für die Uebertragung der Aufgabe, für alle Anregungen, die er mir gegeben, und die Unterstützung, die er mir gewährt hat, meinen besonderen Dank auszusprechen.

Schrifttum.

Ambronn, H.: Anleitung zur Benutzung des Polarisationsmikroskops bei histologischen Untersuchungen. Leipzig, H. Robolsky 1892.

Busch: Zur Technik der mikroskopischen Knochenuntersuchung. Arch. f. mikroskopische Anatomie Bd. XIV 1879.

Czokor: Knochenschneidemaschine. Verhandlungen der anat. Ges. auf der VI. Versammlung in Wien 1892.

v. Ebner: Ueber den feineren Bau der Knochensubstanz. Sitzungsbericht der k. k. Akad. d. Wiss. Wien Bd. LXXII 1875.

— Untersuchungen über das Verhalten des Knochengewebes im polarisierten Licht. Sitzungsbericht der k. k. Akad. d. Wiss. Wien. Bd. LXX 1874.

Gebhardt, W.: Ueber funktionell wichtige Anordnungsweisen der feineren und gröberen Bauelemente der Wirbeltierknochen Arch. f. Entwicklungsmech. d. Organismen. Bd. 11 u. 12 1900, Bd. 20 1905.

— Auf welche Art der Beanspruchung reagiert der Knochen mit Ausbildung einer entsprechenden Architektur? Arch. f. Entwicklungsmech. d. Organismen. Bd. 16 1903.

Harting: cit. nach Schmorl.

v. Kölliker: Handbuch der Gewebslehre. VI. Aufl., Bd. I. Leipzig W. Engelmann 1889.

Krukenberg: Ueber eine sehr vorteilhafte Methode der Zubereitung von Zahn- und Knochenschnitten für die mikroskopische Beobachtung. Müllers Archiv 1849.

Ranvier: Technisches Lehrbuch der Histologie. F. C. W. Vogel, Leipzig 1888.

Recklinghausen: cit. nach Schaffer.

Roux, W.: Gesammelte Werke über Entwicklungsmechanik der Organismen. Leipzig 1895.

Schaffer, J.: Die Methodik der histologischen Untersuchung des Knochengewebes. Zeitschr. f. wissensch. Mikr. Bd. X. 1893.

Schmorl: Die pathologisch-histologischen Untersuchungsmethoden. F. C. W. Vogel, Leipzig 1905.

Stöhr: cit. nach Schmorl.

Tripel: cit. nach Schmorl.

Valentin: Die physikalische Untersuchung der Gewebe. 1867 Bd. II.

Volkmann: cit. nach Schaffer.

Lebenslauf.

Am 8. August 1916 bin ich als Sohn des Lehrers Otto Jentschura und seiner Ehefrau Erika, geborene Maue, in Grünberg in Schlesien geboren und wurde am 24. September 1916 in der evangelischen Kirche zu Grünberg getauft. Von 1923—1927 besuchte ich die VIII. Gemeindeschule zu Görlitz in Schlesien und trat Ostern 1927 in das dortige Reform-Realgymnasium ein. Infolge Versetzung meines Vaters wurde ich im Juli 1932 in die U2 Rg der Richard-Wagner-Schule zu Berlin-Neukölln umgeschult, an der ich Ostern 1936 die Reifeprüfung ablegte. Vom 3. April bis 30. September 1936 genügte ich meiner Arbeitsdienstpflicht in der Abteilung 2/104, Lauban in Schlesien. Da ein freiwilliger Eintritt in das Heer mangels freier Stellen nicht möglich war, konnte meine Immatrikulation an der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin als Student der Medizin zum Winter-Semester 1936 erfolgen. Den I. Abschnitt der ärztlichen Vorprüfung legte ich am 26. Februar 1938, den II. Abschnitt am 28. Februar 1939 vor dem Prüfungsausschuß der Universität Berlin ab.

Den klinischen Teil des Studiums mußte ich infolge Einberufung zum Wehrdienst am 6. 6. 1940 unterbrechen. Auf Grund einer besonderen Verfügung wurde ich jedoch im Oktober 1940 zur Beendigung des Studiums und zur Ablegung des Staatsexamens beurlaubt.